

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ФУНДАМЕНТІВ НА СКЛАДНИХ ОСНОВАХ

Трофимчук О.М., Савицький О.А.

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору  
НАН України  
м. Київ, Україна

**АНОТАЦІЯ:** Стаття присвячена розрахункам динамічної просторової взаємодії фундаментів мілкового закладання з ґрунтовою основою, яка моделюється методами механіки суцільного середовища з використанням методу ортогональних поліномів для чисельного розв'язку просторових динамічних контактних задач.

**АННОТАЦИЯ:** Статья посвящена расчетам динамического пространственного взаимодействия фундаментов мелкого заложения с грунтовым основанием, которое моделируется методами механики сплошных сред с использованием метода ортогональных полиномов для численного решения пространственных динамических контактных задач.

**ABSTRACT:** Article is devoted to methodology of dynamic spatial interaction of the shallow foundations and the soil base. Soil is modelled by methods of continuum mechanics with application of a method of orthogonal polynomials for the numerical solution of spatial dynamic contact problems.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** Динамічна взаємодія фундаменту з основою, динамічні просторові контактні задачі, метод ортогональних поліномів.

### ВСТУП

Розробка методів та програм розрахунків динаміки енергетичних та гідротехнічних споруд при їх проектуванні та експлуатації є актуальною проблемою. Розглядається взаємодія споруд з ґрунтовими основами, які відрізняються шаруватістю чи насичені поровою рідиною. Знаходяться резонансні частоти та амплітуди коливань фундаментів мілкового закладання.

Фізико-математичні моделі системи фундамент-основа розробляли В.О. Бабешко, І.П. Бойко, М.М. Бородачов, Ю.Л. Винников, Є.В. Глушков, М.І. Забилін, М.Л. Зоценко, В.О. Іллічов, Ю.О. Кірічек, П.І. Клубін, Б.Г. Коренев, А.С. Моргун, О.О. Петраков, О.С. Сахаров, В.М. Сеймов, В.Г. Таранов, О.Я. Шехтер, R.N. Arnold, G.N. Bycroft, P. Christiano, G. Gazetas, M.R. Halpern, G. Mylonakis, R.Y.S. Pak, H.S. Paul, J.-D.M. Saphores, G.B. Varburton, W.L. Whittaker, J.P. Wolf та інші.

Горизонтально-шарувата основа стосовно питань динаміки споруд досліджувалась І.І. Воровичем, В.О. Бабешко та їх учнями, а також І.В. Ловцовим, Л.А. Молотковим, А.Є. Саргсяном та іншими.

Пористопружне насичене рідиною середовище як модель ґрунтової основи споруд застосовували Б.Й. Дідух, А.Г. Мішель, В.М. Лятхер, Б.М. Островерх, О.М. Гомілко, Н.С. Городецька, С.Г. Шульман, P. Christiano, Y.M. Cheng, M.R. Halpern, X.H. Ma та інші. В даному напрямку актуальним є розгляд просторових задач для непроникної підоснови, під якою важливо враховувати поровий тиск і зміну в зв'язку з цим загальної реакції та реакції фаз і амплітуд переміщень.

Моделюванню динамічної взаємодії фундаментів з ґрунтовою основою присвячено монографії [1-5]. Розроблено методики розрахунків взаємодії фундаментів споруди з основою методом ортогональних поліномів, створені комплекси програм для розрахунку, виконано аналіз результатів. Нижче викладено результати подальших досліджень.

**Метою роботи** є розробка і розвиток моделей системи “малозаглиблений фундамент - ґрунтова основа”, аналітичних і чисельних методів аналізу просторової динамічної взаємодії фундаментів з основою з урахуванням основних фізичних властивостей: пружності, інерційності, розповсюдження хвиль та загасання коливань у в'язкопружних, шаруватих, пористих пружних насичених рідиною середовищах, воді і елементах конструкцій та використання запропонованих моделей і методів для розв'язку просторових задач динаміки системи “споруда – фундамент – ґрунт”, розрахунків сейсмічних коливань споруд, моделювання коливань вібротрибів.

Виконано розвиток методик для моделювання динамічної взаємодії фундаментів мілкого закладання з ґрунтовою основою за рахунок ускладнення моделей ґрунтового середовища, врахування просторової взаємодії на основі розв'язку просторових динамічних контактних задач. Моделями основи слугують пружний півпростір, в'язкопружне горизонтально-шарувате середовище, пористопружний насичений рідиною (ППНР) півпростір. Враховується інерційна взаємодія фундаменту з ґрунтовою основою та загасання коливань за рахунок випромінювання пружних хвиль та поглинання енергії коливань в матеріалі ґрунту. Для горизонтально-шаруватої основи моделюються резонансні ситуації. Для ППНР півпростору враховується взаємодія в'язкої порової рідини з пористопружним скеле-

том ґрунту. Проводиться застосування результатів до моделювання коливань споруд з урахуванням: надбудови за відповідними розрахунковими схемами (пружний стержень, двохмасова система, тризуб); взаємодія з шаром води (циліндричні льодостійкі платформи на шельфі) [2, 5]. В монографіях [1, 3] враховувались також пружні деформації фундаментів.

## **КОЛИВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ СПОРУД, ЩО ВЗАЄМОДІЮТЬ З ПРУЖНОЮ ОСНОВОЮ ТА ШАРОМ ВОДИ**

Розроблено методики розрахунків для дослідження динаміки морських гравітаційних платформ при їхній взаємодії з ґрунтом і з навколишнім водним середовищем при сейсмічних та техногенних діях. Дослідження ґрунтуються на розв'язку динамічних контактних задач для неосесиметричних коливань жорсткого круглого штампа на пружному півпросторі. Роботи виконувались під керівництвом В. М. Сеймова.

Для моделі циліндричної конструкції з круглим у плані фундаментом на пружному півпросторі під шаром води при горизонтально-обертальних, горизонтальних та вертикальних коливаннях споруди встановлено закономірності зміни по частоті та в часі переміщень і прискорень, реакції основи, гідродинамічної реакції при коливаннях циліндра, моменту в пружному стрижні (модель циліндричної надбудови) на рівні з'єднання надбудови з фундаментною плитою залежно від характеру динамічного навантаження, пружності основи, інерційних і деформівних властивостей циліндра й основи, висоти шару рідини. При усталених горизонтальних коливаннях помітні уточнення дає врахування взаємодії з шаром води, що значно змінює резонансну частоту, збільшує резонансні амплітуди коливань деформівного циліндричного корпусу. При збільшенні гнучкості циліндра вплив води збільшується. Збільшення маси циліндра зменшує переміщення. Шар води зменшує резонансну частоту та збільшує амплітуду коливань моменту у вправлянні стрижня в фундамент. Взаємодія з основою знижує прискорення підшови споруди відносно акселерограми площадки. Максимальні прискорення зменшуються зі збільшенням висоти шару води. Досліджено також зміну в часі переміщень та моменту при дії раптово прикладеної постійної горизонтальної сили на верх циліндра. Кількісні співвідношення встановлюються при розрахунках.

## **КОЛИВАННЯ ПРЯМОКУТНОГО ШТАМПА НА ГОРИЗОНТАЛЬНО-ШАРУВАТІЙ В'ЯЗКОПРУЖНІЙ ОСНОВІ**

Розглянуто просторові динамічні контактні задачі про вертикальні та горизонтально-обертальні коливання прямокутного в плані штампа на

основі, яка моделюється в'язкопружним шаруватим середовищем таких типів: 1 - півпростору, 2 - пружного шару, зчепленого з жорсткою основою та 3 - з пружним півпростором, а також 4 - двох пружних шарів, зчеплених з жорсткою основою. Інтегральні рівняння методом ортогональних поліномів зведено до нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів рядів розкладання контактних напружень по ортогональним поліномам. Розроблено ефективні методики обчислення коефіцієнтів. Врахування в'язкості по моделі частотно-незалежного внутрішнього тертя забезпечує виконання умов випромінювання, значно спрощує обчислення подвійних інтегралів і проявляється у зниженні переміщень штампа і збільшенні модуля реакції на власних частотах системи та резонансних частотах шаруватої основи.

Проаналізовано числові результати зміни при гармонічних та нестационарних діях рівнодіючих реакції основи та переміщень в залежності від форми штампа і характеристик шаруватості основи. При збільшенні маси штампа власні частоти зменшуються, для масивного штампа характер коливань визначається в основному власною частотою системи, а при зменшенні маси штампа знижується прояв резонансів. Висота в'язкопружного шару, при якій при вертикальних коливаннях помітні резонанси, не перевищує 4-х ширин квадратного штампа. Кількісні співвідношення встановлюються при розрахунках.

Виконано порівняння розрахункових амплітудно-частотних характеристик з відомими експериментальними результатами для вібростанини на шарі ґрунту, встановлено задовільне узгодження.

Для сейсмічних коливань проаналізовано зміну в часі реакції основи при дії короткочасного навантаження та прискорення штампа порівняно з акселерограмою площадки. При горизонтальних сейсмічних коливаннях прояв ефектів шаруватості є незначним.

## **ВЕРТИКАЛЬНІ КОЛИВАННЯ ПРЯМОКУТНОГО ШТАМПА НА ППНР ПІВПРОСТОРИ**

Отримано аналітичні вирази для динамічних переміщень границі двофазного пористопружного насиченого рідиною півпростору (модель М. Біо) при дії розподілених навантажень на обидві фази на прямокутній площадці границі [5].

Виконано постановку задачі про вертикальні коливання жорсткого прямокутного в плані штампа з непроникною для порової рідини підшвою на пористопружному насиченому рідиною півпросторі. Проведено асимптотичний аналіз особливостей розподілу ефективних напружень і

порового тиску під подошвою непроникного штампу на ППНР середовищі. Система інтегродиференційних рівнянь зведена до нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів рядів допоміжних функцій для визначення розподілу ефективних напружень і порового тиску. Розроблено методика обчислення коефіцієнтів системи у вигляді подвійних невластних інтегралів.

Досліджено вплив частоти коливань, розмірів подошви штампa і його маси, проникності (коефіцієнта фільтрації) пористопружного насиченого рідиною середовища на механічний імпеданс, передаточну функцію та реакції. Розділення складових імпедансу твердої і рідинної фаз дозволило пояснити суттєву відмінність жорсткості двофазної основи від пружної однофазної. Жорсткість твердого скелету змінюється пропорційно жорсткості пружної основи, а складова жорсткості рідинної фази приймає зі збільшенням частоти протилежний знак. Демпфірування збільшується з ростом частоти коливань. При дії гармонічної сили постійної амплітуди на масивний штамп присутність порової рідини і взаємодія фаз знижує максимальну амплітуду реакції і збільшує реакцію при подальшому зростанні частоти. При низьких частотах реакція твердої фази більша за реакцію порової рідини. Фаза загальної реакції і реакції порової рідини співпадають. Зі збільшенням величини коефіцієнта фільтрації збільшується доля твердої фази в реакції основи при низьких частотах і на частоті максимуму реакції.

## РОЗРАХУНКИ НА АНАЛОГОВІ АКСЕЛЕРОГРАМИ

Для масивних споруд розраховуються функції прискорень в разі дії інерційного навантаження, що змінюється в часі як  $\delta$ -функція. Результат згортки функції з акселерограмою представляє трансформовану акселерограму. З використанням створеного комплексу комп'ютерних програм проведені розрахунки сейсмічних прискорень споруди блоку ЧАЕС з урахуванням взаємодії з ґрунтом (в'язкопружна та пористопружна водонасичена основи) при дії заданих синтезованих для площадки ЧАЕС акселерограм. Вивчено вплив швидкості пружних поперечних хвиль у ґрунтовій основі на трансформацію вихідної акселерограми землетрусу для споруд. Для водонасиченої основи встановлено відмінності спектральної щільності вихідних і розрахункових акселерограм у сейсмічному діапазоні частот.

Розроблено методика розрахунку динамічної взаємодії циліндричної конструкції з пружною основою, шаром води і льодом, складено програми розрахунку на ЕОМ, виконано сейсмічні розрахунки варіантів конструкції, проведено аналіз результатів розрахунків.

## ВИСНОВКИ

Розвинуто метод ортогональних поліномів для розв'язку просторових динамічних контактних задач при моделюванні динамічної взаємодії малозаглиблених фундаментів з ґрунтовою основою. Метод відрізняється використанням аналітичних розв'язків для переміщень площадки границі моделі основи під фундаментом і врахуванням теоретичних особливостей розподілу контактних напружень, що забезпечує ефективність методу. Динамічна реакція основи споруди при зовнішніх діях враховується в будь-який момент часу.

Підтверджено достовірність отриманих розрахункових результатів задовільною узгодженістю з експериментальними даними інших авторів для усталених коливань віброташин (частоти з максимальною амплітудою переміщень) та вільних коливань масивних блоків на ґрунтовій основі (зміна горизонтальних переміщень в часі) і співпадінням з відомими аналітичними та чисельними результатами в граничних випадках.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Сеймов В.М. Динамические контактные задачи / В.М. Сеймов. – К. : Наук. думка, 1976. – 284 с.
2. Сеймов В.М. Динамика и сейсмостойкость гидротехнических сооружений / В.М. Сеймов, Б.Н. Островерх, А.И. Ермоленко. – К. : Наук. думка, 1983. – 318 с.
3. Сеймов В.М. Колебания и волны в слоистых средах / В.М. Сеймов, А.Н. Трофимчук, О.А. Савицкий. - К. : Наук. думка, 1990. – 224 с.
4. Трофимчук А.Н. Динамика пористоупругих насыщенных жидкостью сред / А.Н. Трофимчук, А.М. Гомилко, О.А. Савицкий. – К. : Наук. думка, 2003. – 230 с.
5. Трофимчук А.Н. Сейсмостойкость сооружений с учетом их взаимодействия с грунтовым основанием / А.Н. Трофимчук . – К. : УИИОСР, 2004. – 72 с.

Стаття надійшла до редакції 15.09.2013 р.